

岩質材料の動的破壊に対する破壊力学の考察

山口大学工学部

学生員 ○寺戸秀和

正会員 荒木義則

正会員 清水則一

正会員 中川浩二

1. はじめに 発破工法の一つとして、爆破孔の周縁に切欠きなどをつけてクラックの進展を制御する制御発破工法があるが、その効果のメカニズムなど理論的な根拠は、まだ十分明らかにされていないようである。そこで本研究では、動的破壊力学を用いて、岩質材料の動的破壊実験結果の評価を行う。

2. 動的破壊力学のモデル 衝撃荷重を受けた材料の破壊の強度評価には、物体の慣性力を考慮した動的破壊力学による取扱いが必要になる。動的破壊力学において用いるパラメータは静的破壊力学同様、応力拡大係数あるいはエネルギー解放率であるが、それらが時間 t および亀裂の進展速度 c の関数となり、動的応力拡大係数 $K(t, c)$ は次式で与えられる¹⁾。

$$K(t, c) = k(c) K^*(t) \quad \dots (1)$$

ここで $k(c)$ は亀裂の進展速度に関する関数で $0 \leq k(c) \leq 1$ である。また、 $K^*(t)$ は進展する亀裂を仮想的に停止させたときの静的な応力拡大係数である。

動的破壊力学における亀裂の進展開始の条件は動的応力拡大係数を用いて次のように表すことができる。

$$K(t, c) \geq K_D \quad \dots (2)$$

ここで K_D は、動的破壊靱性と呼ばれる。動的破壊靱性も静的破壊靱性と同様に、材料が同質ならば一定値になると思われるが、実際には動的破壊靱性は負荷条件や荷重速度あるいは亀裂の進展速度に依存するため、静的な破壊力学の考え方を直接適用する場合、必ずしも一定値にはならない。そこで本研究では、Freund²⁾あるいはBroberg³⁾によって求められた亀裂先端の動的特異応力場を用いて動的応力拡大係数を求め、それらを動的破壊実験結果に適用する。

Freundのモデルは、速度 c で片側に進展する亀裂のモデル（図1参照）で、この場合の動的応力拡大係数は、



図1 片側に進展する亀裂モデル

$$K = \frac{c^{-1}}{(c^{-1} + c_{r2})\sqrt{(1 - c/c_1)}} K^*(t) \quad \dots (3)$$

で与えられる²⁾。ここで $c_{r2} = (1 - c/c_r)/c$ であり、 c_r はレイリー波の速度、 c_1 は縦波の速度である。

Brobergのモデルは、速度 c で両側に進展する亀裂のモデル（図2参照）で、この場合の動的応力拡大係数は、

$$K = f(s_1, s_2) [4s_1 s_2 - (1 + s_2^2)^2] K^*(t) \quad \dots (4)$$

で与えられる³⁾。ただし、 c_1 は横波の速度で $f(s_1, s_2)$ 、 s_1 、 s_2 はそれぞれ、

$$\begin{aligned} f(s_1, s_2) &= s_1 \{ [(1 + s_2^2)^2 - 4s_1^2 s_2^2] K(s_1) - 4s_1^2 (1 - s_2^2) K(s_2) \\ &\quad - [4s_1^2 + (1 + s_2^2)^2] E(s_1) + 8s_1^2 E(s_2) \}^{-1} \\ s_1 &= \sqrt{1 - (c/c_1)^2}, \quad s_2 = \sqrt{1 - (c/c_1)^2} \end{aligned}$$

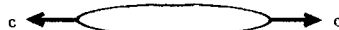


図2 両側に進展する亀裂モデル

である。ここで K 、 E はそれぞれ第一種および第二種の完全楕円積分である。

また本研究では、亀裂の進展速度にはMott⁴⁾によって求められた

$$c = 0.38 c_1 (1 - a_1/a) \quad \dots (5)$$

を用いた。ここで a_1 は初期亀裂長、 a は進展後の亀裂長である。

3. 実験概要と動的破壊力学による考察 実験は二種類行った⁵⁾。すなわち、①衝撃引張り応力を受けるモルタルの破壊靱性試験；切欠きを有するモルタル棒の一端を鉄球で打撃し、モルタル棒を伝わる弾性波の大き

さと破断状態を観察する(図3参照)。②ディスク状の切欠きを有するモルタル供試体の発破実験;ディスク状の切欠きを内部に持つ円柱供試体に爆速の異なる二種類の爆薬(導爆線[爆速:約6500m/s],コンクリート破砕器[爆速:約50m/s])を用いて発破を行い,ディスクの直径と薬種・薬量の変化に伴う亀裂の進展と破砕状態を観察する(図4参照)。図5に①の実験結果を静的破壊力学を用いて評価したときの破壊靱性 K_d (○)と,①と同じ供試体を用いて行われた,三点曲げ静的破壊靱性試験の結果より求めた静的破壊靱性 K_c (*)を示す。図5によると a/w が0.15付近までは,両者ともほぼ同一の挙動を示しているが, a/w が0.15を超えたあたりから三点曲げによる破壊靱性はほぼ一定値を示しているのに対し, K_d は a/w が0.15を超えても一定値にはならず,緩やかな曲線で増加している。そこで $a/w > 0.15$ の実験結果に対して,亀裂の進展速度を考慮し,式(3)を用いて動的破壊靱性 K_D (図5●)を求めた。図5から亀裂の進展速度を考慮した場合の動的破壊靱性 K_D はほぼ一定値を示すことが分かる。

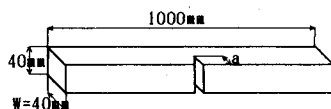


図3 モルタル棒供試体の形状および寸法

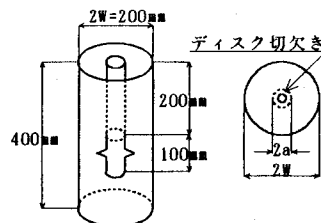


図4 円柱モルタル供試体の形状および寸法

次に②の実験において,導爆線およびコンクリート破砕器を用いた結果に対して,静的破壊力学を適用して求めた破壊靱性 K_d (□, △)と,亀裂の進展速度を考慮して式(4)を用いて求めた動的破壊靱性 K_D (■, ▲)を図6に示す。図6から,静的破壊力学を適用したときは a/w の増加とともに破壊靱性も増加しているが,亀裂の進展速度を考慮することによりほぼ一定値を示し,静的破壊靱性との差も小さくなっていることが分かる。

4. むすび 本研究では実験データに動的破壊力学を適用して動的破壊靱性を求めた。その結果,亀裂の進展速度を考慮した動的破壊靱性は,それを考慮しないで静的に評価した破壊靱性に比べて,実験の相異によるばらつきが小さくなることが分かった(表1参照)。ただし,それらの値はなお実験による差があり,それをどのように説明するかは課題である。

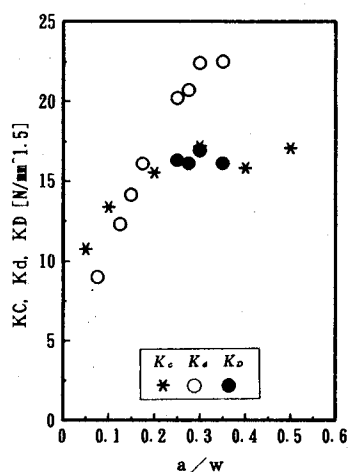


図5 実験①の結果

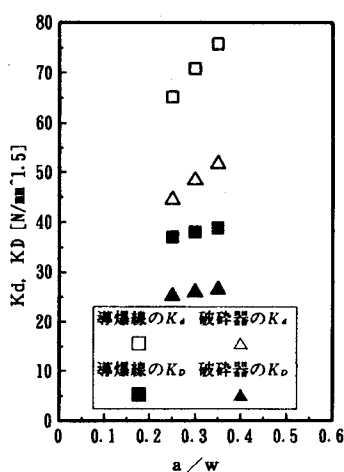


図6 実験②の結果

表1 静的破壊靱性と動的破壊靱性(N/mm^{1.5})

	荒木 ^{*)} (静的)	本研究 (動的)
三点曲げ試験(K_c)	17	—
①衝撃実験	23	17
②低爆速(破砕器)	50	26
②高爆速(導爆線)	70	36

参考文献 1)堀井秀之・矢富盟祥:土木工学ハンドブック I, 技報堂出版, pp. 318~324, 1974. 2) Freund, L. B.: J. Mech. Phys. Solids, Vol. 20, pp. 129~140, 1972. 3)坂田勝・青木繁:機械の研究, Vol. 25 pp. 1557~1562, 1973. 4)岡村弘之:線形破壊力学入門, 培風館, 1976. 5)荒木義則・中川浩二:岩質材料の掘削に関する線形破壊力学の応用, 土木学会中国四国支部研究発表講演概要集, pp. 786~787, 1993.